Caldasia 24(1) 2002: 135-156

ESTABLECIMIENTO DE VALORES DE BIOINDICACIÓN PARA MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Construction of a biological indication system for aquatic macroinvertebrates of the Savanna of Bogotá

WOLFGANG RISS
Abt. Limnologie, Universität Münster, Alemania. riss@uni-muenster.de

RODULFO OSPINA
Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Apartado 14490. rospina@ciencias.unal.edu.co.

JUAN D. GUTIÉRREZ
Diagonal 8F No. 82-10 - Bogotá, Colombia. quiros@ciencias.unal.edu.co.

RESUMEN

Se presenta una metodología que permite el establecimiento de un sistema de indicación biológica para la contaminación orgánica de aguas corrientes sobre la base de macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá, Colombia - Norte de los Andes. Se asignan valores numéricos de indicación para 57 familias del macrobentos obtenidos con el objeto de cumplir los requerimientos básicos del sistema *BMWP*, establecido para la bioindicación de contaminación orgánica en Inglaterra y - con ciertas modificaciones - en España. El principal objeto de este estudio es expresar el efecto de la contaminación orgánica como un factor ambiental específico más que afecta la distribución de las familias del macrobentos en la región de estudio. Para este propósito, el empleo de un promedio ponderado, el cual permite obtener valores de indicación numérica aplicables y fácilmente reproducibles, resultó ser tan o más eficiente que las técnicas multivariadas de regresión. El estudio se llevó a cabo de acuerdo con el siguiente diseño: 1. Se tomaron muestras en 28 sitios localizados en 8 corrientes de agua en alturas de 2550 a 3300 msnm. Se tomaron datos biológicos y datos fisicoquímicos por un periodo de dos años incluyendo periodos de diferentes niveles de caudal. 2. El macrobentos fue muestreado en diferentes coriotopos (microhábitats). 3. Se ordenaron 18 variables fisicoquímicas mediante un análisis de factores. Nueve de ellas fueron determinadas como componentes del primer factor ambiental indicativo de contaminación orgánica. 4. Se calcularon los valores (scores) de calidad fisicoquímica (C_{fq}) usando las nueve variables fisicoquímicas seleccionadas anteriormente. 5. Los valores de indicación (T_m) que deben corresponder a la tolerancia mínima (T_m) a la contaminación orgánica fueron determinados para cada familia del macrobentos a través del quinto percentil de la curva de distribución normal ajustada de las abundancias de las familias sobre las diez clases de C_{fq}. La base conceptual del procedimiento es la definición y aplicación estrictamente numérica de los valores de indicación y de los índices derivados de ellos para asegurar que sean reproducibles. Las bases de datos están publicadas en el siguente web site ‘http://www.encuentro.org/BMWP-Colombia’.

Palabras clave. Bioindicación, contaminación orgánica, macroinvertebrados, ríos, Sabana de Bogotá.

ABSTRACT

A methodology is presented which enables the construction of a biological indication system for organic pollution of running waters on the basis of aquatic macroinvertebrates of the Savanna of Bogotá, Colombia - northern Andes. Numerical indication scores were asigned to 57 families of the macrobenthos with the aim to comply with the requirements of the *BMWP* system which has been established for biological indication of water pollution in Great Britain and - with some modifications - in Spain. The main objective of this study was to point out the effect of organic pollution as specific environmental factor which affects the distribution of the macrobenthos families in the studied region. For this approach, employment of the weighted averaging which permitted obtaining applicable and easily reproducible numerical indication scores, resulted in being as much as or more efficient than multivariate regression techniques. The study was carried out with the following design: 1. Samples were taken from 28 sites located at eight running waters in altitudes between 2550 and 3300 masl. Biological and physico-chemical data were taken during a period of two years including periods of different discharge levels. 2. Macrobentos was sampled from different choriotopes. 3. 18 physico-chemical parameters were ordinated by multivariate analysis. Nine parameters were determined as components of the main environmental factor indicating organic pollution. 4. Water quality scores (C_{fq}) were calculated by the following way: a) Each of the nine parameters of organic pollution selected above. 5. Indication scores (T_m) had to correspond to the minimum tolerance to organic contamination. This specification was determined for each macrobethos family with the 5th percentile of the normal distribution fitted to abundance curve along the 10 classes of C_{fq}. The concept of the procedure is the strictly numerical definition and application of the indices in order to ensure reproducibility. The method shall be presented as a tool susceptible to being extended and calibrated by additional information. The data bases are found published on the following web site 'http://www.encuentro.org/BMWP-Colombia'.

Key words. Bioindication, macroinvertebrates, organic pollution, Savanna of Bogotá, stream.

INTRODUCCIÓN

La expresión práctica del conocimiento de la autoecología y la taxonomía de las especies o grupos supraespecíficos que conforman las comunidades acuáticas debe ser un sistema que permita la evaluación de la calidad del agua de un sitio usando los organismos encontrados en él.

Mediante un sistema de bioindicación la información taxonómica se traduce en un índice, valor o clase de calidad de agua, lo que facilita la interpretación de gran número de datos que resultan de los llamados "monitoreos biológicos" y hace los resultados más accesibles para aquellas personas que deben tomar decisiones acerca del manejo de los cuerpos de agua (Cairns & Pratt 1993; Alba-Tercedor 1996). Sobre la importancia y los problemas generales relacionados con el establecimiento de índices biológicos se encuentran en la literatura gran cantidad de trabajos teóricos, así como métodos publicados (Alba-Tercedor & Sanchez-Ortega 1988, Hellawell 1989, Kelly & Whitton 1998, Prat et al. 1986, Reynoldson et al. 1997, Rosemberg & Resh 1993).

Desde el reconocimiento faunístico de un cuerpo de agua o de una región hasta el establecimiento y aplicación de un sistema de bioindicación se debe recorrer un camino que pasa por la resolución objetiva de varias preguntas:

1. Cuál es el concepto y los parámetros o variables de calidad de agua que se adoptan?
2. Cuales son los niveles de tolerancia de los taxones utilizados respecto al concepto o las variables de calidad anteriormente definidos?
3. Cuál es el procedimiento para expresar el valor de calidad de agua de un sitio a partir de los niveles de tolerancia y/o de las abundancias de los taxones encontrados en él?

La información taxonómica y autoecológica disponible hasta el momento sobre la fauna de macroinvertebrados acuáticos de Colombia ha permitido sólo un acercamiento conceptual y no cuantitativo a la segunda pregunta. Asignaciones de tolerancias tales como “oligotrófico” o “tolerante a aguas medianamente contaminadas”, las cuales son comunes en los resultados de muchos trabajos, no permiten la utilización de un procedimiento numérico estandarizado para la obtención de valores o juzgamientos acerca de la calidad de un sitio o estación de muestreo. Los valores de los macroinvertebrados como indicadores que se encuentran publicados hasta la fecha son construidos con base en resultados no numéricos y por esto no incluyen la opción de ser extendidas y adaptadas a zonas geográficas diferentes (Zúñiga de Cardoso et al. 1997, Roldán 1999).

En este trabajo se desarrollan los siguientes puntos según las preguntas anteriormente planteadas:

1. Se determina, para una serie de sitios de referencia de una región geográfica determinada, una escala e índices numéricos de calidad de agua basados en variables fisicoquímicas escogidas mediante un análisis previo.
2. Se establecen valores numéricos de tolerancia a la contaminación orgánica con base en estos índices y de acuerdo a la distribución de los taxones considerados.
3. Se propone la adopción de un procedimiento ya establecido (*BMWP* según Armitage et al. 1983), para la obtención de índices numéricos de contaminación por sitios a partir de los valores primarios de indicación por taxones establecidos anteriormente.

El gradiente altitudinal sobre el cual estan localizadas las estaciones hizo necesario considerar la altura como un factor geográfico de orden superior que determina las condiciones ambientales y la distribución de la fauna acuática, independientemente del grado de contaminación. Por esta razón se llevó a cabo un análisis multivariado para estimar la importancia de la contaminación orgánica en relación a otros factores ecológicos, incluida la altura y finalmente para definir las variables fisicoquímicas determinantes de ella. Los valores de calidad de agua se fundamentan entonces en las variables de contaminación seleccionadas y en cálculos aritméticos que facilitarán la ulterior extensión del sistema.

Como la meta principal de este trabajo no es describir todo el conjunto de factores que afectan la distribución de los macroinvertebrados, sino destacar el efecto de un solo factor: la contaminación orgánica, no se aplicaron procedimientos que incluyen un número elevado de variables, tales como análisis de correspondencias, sino métodos más simples y específicos. Consecuentemente se determinaron los valores de tolerancia a través del promedio ponderado y la distribución Gauss ajustada, un método demostrado como «medida consistente y eficiente para el valor de una variable ambiental» (Ter Braak & Barendtregd 1986, Ter Braak & Looman 1986).

Con el establecimiento de valores numéricos de indicación primaria o de tolerancia basados en la distribución real de los taxones considerados, se pretende hacer posible la apli-

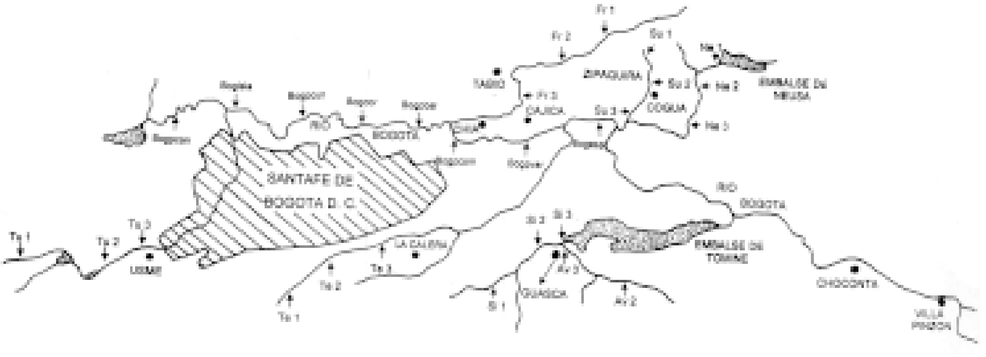
Fr 1
Fr 2
Su 1
Ne 1
TABIO
ZIPAQUIRA
Su 2
Ne 2
EMBALSE DEL NEUSA
Fr 3
CAJICA
COGUA
Su 3
Ne 3
RIO
BOGOTA
SANTAFE DE BOGOTA D. C.
RIO
BOGOTA
Tu 1
Tu 2
Tu 3
USME
Si 2
Si 3
LA CALERA
EMBALSE DE TOMINE
Te 3
Te 2
Av 3
Te 1
Si 1
GUASCA
Av 2
CHOCONTA
VILLA PINZON

Figura 1. Estaciones de muestreo. Tu: Río Tunjuelito, Te: Río Teusacá; Si: Río Siecha, Av: Río Aves, Ne: Río Neusa, Su: Río Susagua, Fr: Río Frio, Bo: Río Bogotá.

cación de un sistema de bioindicación funcional en la región estudiada, a manera de adaptación del sistema *BMWP*. Los resultados de este trabajo se refieren a una base geográfica y temporal limitada. Por otra parte, el procedimiento de cálculo corresponde a un método definido y fácil de reproducir, lo que permite un perfeccionamiento sucesivo valiéndose de un mayor número de datos empíricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionaron 20 sitios en siete ríos localizados en la cuenca alta y media del río Bogotá (Fig. 1), ubicados entre 2550 y 3300 msnm.

La mayor parte de las corrientes de la cuenca alta del río Bogotá y de sus principales afluentes, están levemente afectadas por actividades humanas, mientras que en su parte media, en la zona plana de la Sabana de Bogotá se presenta un mayor grado de contaminación, producido principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas y por los desechos derivados de una intensa actividad agrícola e industrial.

Adicionalmente se incluyeron en el análisis los datos fisicoquímicos y faunísticos de ocho estaciones localizadas en el río Bogotá presentados por Bohorquez (1989). Esta información corresponde a sitios con contaminación media a muy alta.

Toma de muestras y obtención de datos

En las 20 primeras estaciones se llevaron a cabo cuatro campañas de muestreo en: 17-29 octubre 1996, 10-17 marzo 1997, 17-24 julio 1997, y 9-17 diciembre 1997. Estas fechas correspondieron a épocas del año con caudales de los ríos en diferentes niveles. La quinta serie de muestras del río Bogotá se compone de los datos biológicos presentados por Bohorquez (1989) y una campaña de muestreos complementarios realizada en julio de 2001.

Los macroinvertebrados fueron colectados semicuantitativamente en cada uno de los sitios, usando redes circulares de 20 cm de diámetro y 300 µm de ojo de malla. En cada sitio se tomaron muestras separadas en diferentes coriotopos tomando en cuenta como criterios básicos el tipo de sustrato disponible (roca, piedras, arena, vegetación de orilla etc.) y la velocidad de la corriente (Armitage et al. 1995, Cogerino et al. 1995, Beisel et al.1998).

Los especímenes fueron preservados en etanol al 70 % en recipientes plásticos, etiquetados y transportados al laboratorio para su posterior separación, ordenamiento en una colección y determinación taxonómica a nivel de familia. Debido a que el concepto del *BMWP* parte de la base que el nivel de definición taxonómica ha de ser a familia, en el presente trabajo se presentan y analizan taxones con este nivel de identificación y en algunos casos como en los ácaros o los oligoquetos, a un nivel superior.

Las condiciones ambientales de los sitios de muestreo fueron caracterizadas mediante 18 variables fisiográficas y fisicoquímicas para las cuales se indican las abreviaturas utilizadas en el texto, las unidades y las referencias bibliográficas.

Medición directa: Altitud sobre el nivel del mar (altitud: m), velocidad superficial de corriente (vel: cm/s), número de coriotopos o mesohábitats (corio), caudal (caudal: m^3/s, estimado a través la relación sección-velocidad) según Aparicio (1994), temperatura del agua (temp: °C), concentración de oxígeno (conc-O_2: mg/l, electrodos polarográficos) y conductividad (cond: µS/cm, electrodos de platino) respectivamente según Slevogt (1994), variación de la concentración de oxígeno (var-O_2: %) y variación del caudal (var-caudal: %).
Análisis inmediato: Acidez (pH), concentración de amonio (NH_4: mg/l), fósforo total (P_{tot}: mg/l) y ortofosfato (PO_4: mg/l) con kits Aquaquant ® según Schuchart (1996).
Análisis posterior en el laboratorio: Concentración de sólidos sedimentables (sólidos: ‰ volumen sedimentado), concentración de materia orgánica total (MO_{tot}: mg/l) y concentración de materia orgánica particulada (MOP: mg/l) respectivamente según Fresenius et al. (1988), demanda biológica de oxígeno a cinco días (DBO_5: mg/l) y demanda química de oxígeno (DQO: mg/l) respectivamente según Schwoerbel (1975).

Establecimiento del sistema de bioindicación

Primer paso: Determinación del Índice de Calidad Fisicoquímica (C_{fq})
Este índice representa la base objetiva sobre la cual se realizó la obtención de los valores numéricos de indicación de los taxa. El conjunto de medidas de las variables fisiográficas y fisicoquímicas para las estaciones de referencia, incluyendo cálculos de la variación de algunos parámetros corresponden a los promedios de los valores en las diferentes campañas de muestreo.

A través de un análisis de factores (estandarización de valores y rotación varimax) se precisaron grupos de variables fisicoquímicas que corresponden a regímenes ecológicos superiores (Backhaus et al. 1990, Jongman et al. 1995). Todas las variables enumeradas anteriormente fueron incluidas en el análisis.

De esta manera se determinaron las variables *C(i)* calificativas de la contaminación orgánica y su conjunto como factor ecológico en comparación con los demás factores distinguibles mediante este análisis (Fig. 2). Para precisar el efecto de la altitud en la distribución de las variables así como también en los factores precisados se llevó acabo un análisis multivariado de discriminancia (prueba f) (Wildi & Orlóci 1990).

Tabla 1. Ejemplo simplificado para ilustración del método: Obtención de valores de bioindicación en taxones de macroinvertebrados. Se muestra el procedimiento por medio de una sola variable ambiental (*C(i)*) fuera de *n* variables, así mismo por un taxón (*T(i)*) y nueve sitios (S1 a S9) de muestreo.

Cálculo del Índice de Calidad Fisicoquímica C_{fq} de los sitios S1 a S9 a través de cinco pasos

	S1 S S S S S S S S	
variable *C(i)* ial *C(i)* $_1$ *C(i)* *C(i)* *C(i)*		
C *C(i)* a *C()*		

Conversión de las abundancias del taxón T(i) a una escala de cinco clases: 0 0, 1-3 1, 4-10 2, 11-33 3, 34-100 4, >100 5).

sitio	**S1 S S S S S S S S**
género *T(i)* no e e nn	

Determinación de la distribución de abundancia del taxón *T(i)* a lo largo de los diez intervalos de calidad fisicoquímica.

sitios por intervalo C_{fq}	**S4 SS S S S SS S**
intervalos del índice C_{fq} andancia roedio	

Con base en las variables de contaminación *C(i)* se calculó el índice de calidad físicoquímica de las estaciones (C_{fq}). Se aplicó el siguiente procedimiento para cada una de las variables (Tabla 1):

(1) Restricción a límites: Se ajustaron los valores *C(i)* que quedaron fuera de los límites inferiores (*min*) o superiores (max).$C(i)_{min} >= \mathbf{C(i)}_1 <= C(i)_{max}$

De esta manera se lograron circunscribir las variables a intervalos de «significación biológica» que se refieren a las normas internacionales de calificación de aguas corrientes (para discusión y referencias véase Anexo 1).

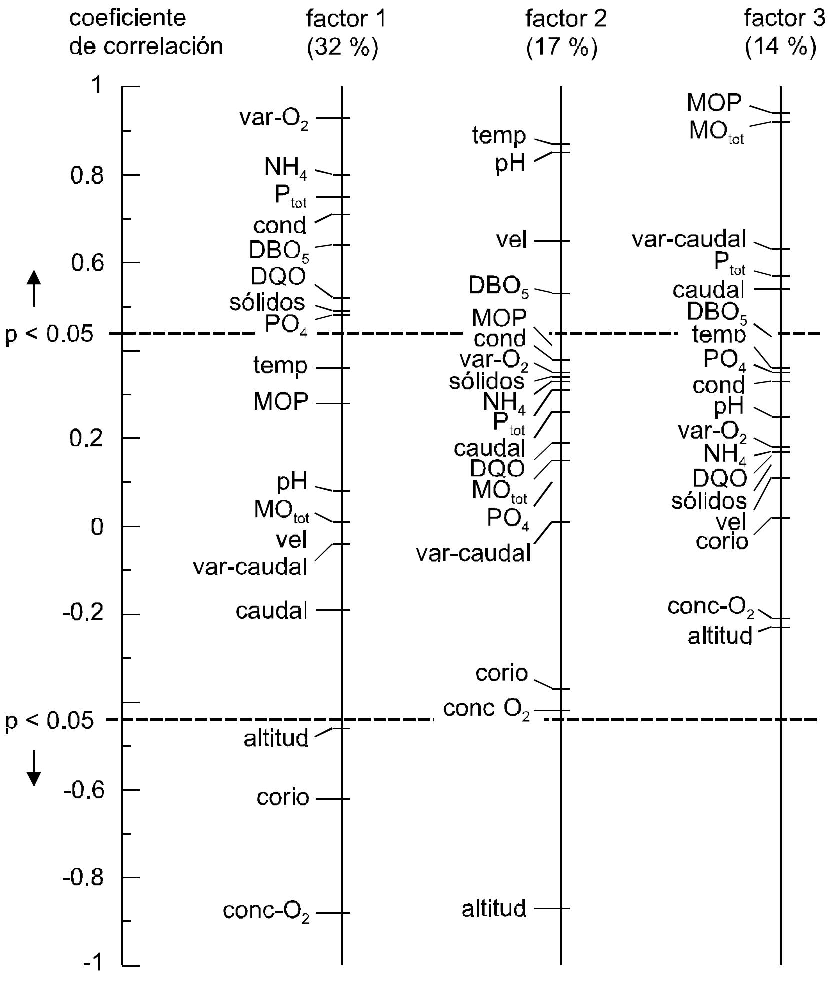

Figura 2. Análisis de factores de las variables fisicoquímicas (promedios temporales). conc-O_2: Oxígeno disuelto (mg/l), var-O_2: Variación del oxígeno disuelto (%), NH_4: Amonio (mg/l), PO_4: Ortofosfato (mg/l), P_{tot}: Fosforo total (mg/l), DBO_5: Demanda biológica de oxígeno (mg/l), DQO: Demanda química de oxígeno (mg/l), MOP: Materia orgánica particulada (mg/l), MO_{tot}: Materia orgánica total (mg/l), sólidos: Sustancia sólida suspendida (vol. %), temp: Temperatura (^{0}C), cond: Conductividad (µS/cm), pH: acidez, caudal: Caudal (l/s), var-caudal: Variación del caudal (%), corio: Número de coriotopos, altitud: metros snm (m).

(2) Transformación 'logaritmo mas uno': De esta manera se lograron aproximar las variables restringidas a distribuciones más equilibradas y de la misma orientación. Igualmente se transformaron los límites inferiores y superiores.

$$\mathbf{C(i)}_2 = \ln(C(i)_1 + 1)$$

En el caso de variables de orientación inversa como la saturación de oxígeno, se transformaron las diferencias entre los límites inferiores y los valores de las variables ajustadas.

(3) Estandarización a la misma categoría de magnitud: Se tomaron las diferencias de los valores de las variables transformadas con los límites inferiores transformados y se dividieron por las diferencias de límites superiores transformados y límites inferiores transformados lo que resultó en valores entre cero y uno.

$$\mathbf{C(i)}_3 = (C(i)_2 - C(i)_{2\,min}) / (C(i)_{2\,max} - C(i)_{2\,min})$$

(4) Ajuste la escala BMWP: Mediante la sustracción de uno y la multiplicación por diez se ajustaron las variables estandarizadas a un intervalo entre cero y diez.

$$\mathbf{C(i)}_4 = (1 - C(i)_3) * 10$$

(5) Obtención del Índice de Calidad Fisicoquímica (C_{fq}): Este índice se calculó como el promedio de las variables ajustadas.

$$\mathbf{C}_{fq} = (suma\ C(i)_4) / n_i$$

Ya que este índice puede adoptar valores entre cero y diez provee la condición previa de poder ser subdividido en diez intervalos de calidad según el sistema BMWP.

De esta manera se construyó un criterio reproducible e independiente para evaluar el nivel de calidad entre condiciones naturales y contaminadas por medio de aquellas variables fisicoquímicas que representaron la contaminación orgánica en los sitios investigados. Un aspecto importante adicional del procedimiento propuesto, es la independencia del número de variables. En caso que no todas variables exigidas estuvieran disponibles en una serie de mediciones el índice C_{fq} se lograría calcular también con base en un número menor de variables.

Segundo paso: Asignación de valores numéricos de indicación a las familias de macroinvertebrados (T_m)

En este trabajo se pretende realizar una adaptación del procedimiento del sistema *BMWP* (Armitage et al. 1983), en el cual el puntaje para la valoración del grado de calidad biológica de una determinada estación o sitio de muestreo se obtiene sumando los valores de indicación de cada familia de macroinvertebrados presente. Por esta razón se estableció un sistema correspondiente de valores numéricos de indicación, asignados a las familias de macroinvertebrados. Los valores de indicación se dedujeron de la tolerancia mínima (T_m) a la contaminación orgánica, que pretende expresar el menor valor de calidad que "resiste" una familia determinada. Las tolerancias mínimas por su parte, se determinaron con base en la distribución de las abundancias de cada taxón en las estaciones de muestreo, repartidas sobre los diez intervalos de calidad fisicoquímica (C_{fq}). Este valor de indicación (T_m) se calculó en cada familia del macrobentos mediante las cuatro siguientes pasos (Tabla 1):

(1) Conversión de las abundancias en cinco clases: Se establecieron las siguientes clases: clase 0, 0; clase 1, < 3; clase 2, < 10; clase 3, < 33; clase 4, < 100 y clase 5, > 100 individuos. Esta transformación reduce el posible efecto de sobrevaloración de la dominancia de algunos grupos a nivel local debido a la distribución natural no homogénea de las familias de macroinvertebrados.

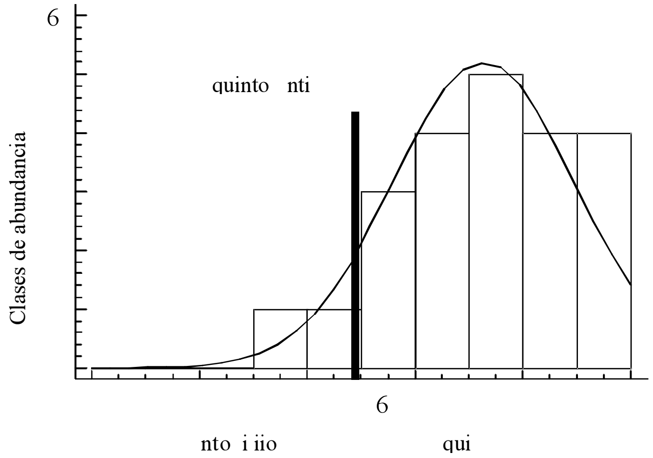

Figura 3. Ejemplo ilustrado de determinación de la tolerancia mínima (T_m) usando el quinto percentil de la distribución de las abundancias a lo largo de diez intervalos de calidad fisicoquímica del agua.

(2) Asignación a los diez intervalos de C_{fq}: Se calcularon las abundancias promedio de cada taxón en cada intervalo de C_{fq} a partir de las clases de abundancia registradas.

(3) Ponderación de los diez intervalos de C_{fq}: Para cada taxón y cada intervalo de calidad fisicoquímica se replicaron los valores C_{fq} según las abundancias promedio correspondientes. Así, para el caso de un taxón con una abundancia promedio de clase tres en el intervalo de calidad cinco, se anotó tres veces ese valor C_{fq}. De esta manera se obtuvo una base de datos que permitió describir la distribución histográfica de cada una de las familias a lo largo de los diez intervalos de C_{fq} (Fig. 3).

(4) Obtención de valores numéricos de indicación (T_m): Finalmente, se tomó el quinto percentil de la distribución normal ajustada al histograma de abundancia por intervalos de calidad fisicoquímica para calcular la tolerancia mínima a la contaminación orgánica, la cual es utilizada como valor primario de indicación.

Aplicación del sistema de bioindicación

Cálculo de puntajes por estaciones (BMWP)
De acuerdo con el procedimiento del sistema *BMWP* (Chesters 1980, Armitage 1983), el puntaje para la valoración de calidad biológica del agua en una determinada estación de muestreo, se obtiene sumando los valores de indicación (T_m) de cada familia de macroinvertebrados presentes. De esta manera se obtuvieron puntajes *BMWP* y *PPT* (Promedio Por Taxón = *BMWP* / número de taxones) para cada una de las estaciones.

Prueba de calidad de predicción

Se estimó la congruencia de los puntajes *BMWP* y *PPT* con el conjunto de valores fisicoquímicos en las 28 estaciones muestreadas mediante una regresión linear múltiple (Drapper & Smith 1998). Para esto se tomaron los puntajes *BMWP* y *PPT* como variables dependientes y las variables fisicoquímicas como independientes. La colinearidad de las variables se determinó con la prueba Draper-Watson (Draper & Smith 1998).

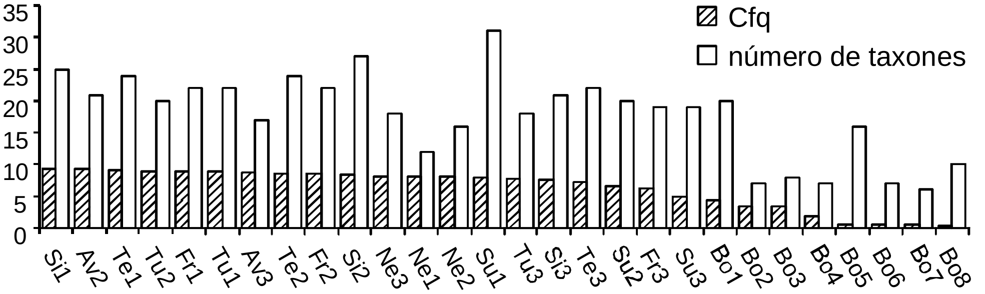

Figura 4. Índice de Calidad Fisicoquímica (C_{fq}) y número de taxones presentes en las 28 estaciones de muestreo.

Tabla 2. Límites superiores e inferiores de los parámetros de contaminación orgánica referente a la significación biológica

variable	eeei eeei	
$_2$l		
var $_2$		
l		
l		
l		
l		
l		
livl		

RESULTADOS

Se encontró un total de 57 taxones entre familias y grupos de orden superior de macroinvertebrados en los cuatro muestreos en 20 estaciones básicas y ocho estaciones complementarias. El número promedio de taxones por estación fue 17 ± 8 (Fig. 4 y Anexo 2).

La mayoría de las 19 variables fisicoquímicas medidas se presentaron dentro de un rango amplio, lo que refleja tanto la diversidad de regímenes ecológicos entre las diferentes corrientes como también entre las estaciones a lo largo de los mismos ríos (Anexos 3 y 4).

Tabla 3. Índices de Calidad Fisicoquímica C_{fq} para los sitios investigados.

sitio	C_{fq}	**sitio**	C_{fq}
Si1			
	Si		
1	1		
	S		
1			
1	S		
	1		
Si		1	
1			
	1		
S 1			

A partir del análisis multivariado se extrajeron tres factores que incluyeron el 63 % de la varianza de los datos fisicoquímicos. Once variables mostraron una correlación significativa ($p < 0.05$) con el principal factor, el cual explicó el 32 % de la varianza de los datos (Fig. 2). Después de eliminar las variables colineares la explicación de las varianzas aumentó un 75 %. Nueve variables fueron relacionadas con la contaminación orgánica (var-O_2, conc-O_2, NH_4, P_{tot}, cond, DBO_5, DQO, sólidos, PO_4). Dos de las variables físicas (altitud y corio), aunque no fueron significantes para la contaminación, se mostraron ligeramente correlacionadas con el factor principal. El segundo factor (17%) asocia las variables relacionadas con las condiciones geográficas y geológicas (altitud, pH, y temp). El tercer factor con el que se explica tan sólo un 14 % de la varianza, agrupa variables relacionadas con el disturbio, es decir la erosión física (MOP, MO_{tot}, var-caudal, y el caudal). Tres variables (DBO_5, P_{tot}, y altitud) exhibieron correlaciones significativas pero subordinadas a otro factor más.

Tabla 4. Importancia y dependecia de las variables fisicoquímicas de la altitud: Correlaciones individuales (corr *r*, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, prob. bilat.) y análisis de discriminancia en los factores (prueba *F*)

variable	**rr *r* reba**
conc-O_2	co
-O_2	- con ncn
	o nc
con -	
	-
	-
O	-
O	-
O -	
o -	
	co
-	o
	oo
-	
-	
O	- co
O -	o co
c -	
-c	
coo	

Para la obtención de los índices de calidad fisicoquímica (C_{fq}) se seleccionaron entonces

Tabla 5. Valores de tolerancia mínima a la contaminación orgánica de familias de los macroinvertebrados en la Sabana de Bogotá (T_m)

índice	**ii**	T_m
10		
	0 1	

índice	**ii**	T_m
0		
1	0	
1 1 1 1 1 1 1	1 1	

1- Taxón encontrado en un solo sitio
2- Método de muestreo no adecuado
3- Identificación incierta

las variables de correlación significativa con el primer eje de factores. A estas variables relacionadas con la contaminación orgánica (var-O_2, conc-O_2, NH_4, P_{tot}, PO_4, cond, DBO_5, DQO, sólidos) se les dieron límites óptimos y pésimos teóricos que se explican y justifican en detalle en el Anexo 1 junto con las referencias que los fundamentan (Tabla 2).

Una vez seleccionadas las variables, se siguieron los procedimientos señalados para la obtención de los índices de calidad fisicoquímica C_{fq}. En los sitios investigados, los valores C_{fq} se distribuyen en toda la escala desde la ausencia aproximada de contaminación orgánica (C_{fq} = 9.3) para las estaciones altas, hasta los índices extremamente bajos